



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

블루투스와의 연동하는 LED기반 수중가시광 통신 시스템 연구

A Study on the LED-based
Underwater Visible Light Communication system interlinked to the Bluetooth

指導教授 孫慶洛

2015年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電子通信工學科

金玟洙

본 논문을 김민수의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장

심 준 환

(인)

위 원

박 동 국

(인)

위 원

손 경 락

(인)

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
1. 서 론	1
2. 가시광 무선통신	
2.1 가시광 무선통신의 개념	4
2.2 가시광 통신의 연구동향	5
2.2.1 국내 기술 동향	5
2.2.2 국외 기술 동향	7
2.3 무선 광채널	9
2.4 수중 가시광 통신	14
3. 실험 및 결과	
3.1 실험 시스템 구성	16
3.2 지상 가시광 무선통신 시스템 성능 실험	23
3.2.1 실험 설정 환경	23
3.2.2 실험 결과	26
3.3 수중 가시광 무선통신과 블루투스 연동 실험	29
3.3.1 수중 실험 구성도	29
3.3.2 실험 내용 및 결과	30

4. 결 론	36
감사의 글	37
참고문헌	38



List of Tables

Table 1 Feature of Optical communication	1
Table 2 Illumination by Lens	11
Table 3 Wireless communications of Underwater	15
Table 4 Devices Specifications	17
Table 5 Specification of Bluetooth module	22
Table 6 Attenuation coefficient by water quality	30



List of Figures

Fig. 1 Visible Light Communication system model	9
Fig. 2 Schematic diagram for light communication	10
Fig. 3 Illumination by light distance(Not using Lens)	12
Fig. 4 Illumination by light distance(Using Lens)	13
Fig. 5 absorption rate according to a wave at Underwater	15
Fig. 6 Circuit of transceiver	16
Fig. 7 Circuit of receiver	17
Fig. 8 Spectrum distribution chart	18
Fig. 9 Divergence angle of LED	18
Fig. 10 Spectrum sensitivity	19
Fig. 11 Field angle of PD	19
Fig. 12 PCB for housing	20
Fig. 13 PCB with housing	20
Fig. 14 Condensing Lens	21
Fig. 15 Bluetooth module	22
Fig. 16 System schematic for image transmission experiment	23
Fig. 17 LabVIEW block diagram	25
Fig. 18 Concentrate light by Lens	26
Fig. 19 Illumination LED by Lens	26
Fig. 20 Visible Light Communication Experiment Environment	27
Fig. 21 Visible Light Communication Experiment Result screen	28
Fig. 22 Underwater Visible Light Communication system	29
Fig. 23 Optical loss by distance at underwater	30
Fig. 24 Schematic of Visible Light Communication system	31
Fig. 25 Photographs of Experimental setup	31
Fig. 26 Hyperterminal Screen for Bluetooth setting	32
Fig. 27 Bluetooth Screen of Smartphone	33
Fig. 28 Image transfer at 3m (230.4Kbps)	34

Fig. 29	Received data on PC	35
Fig. 30	Received data on Smartphone	35



A Study on the Underwater Visible Light Communication system interlinked to the Bluetooth

Min Su Kim

Department of Electronics and Communications Engineering
Graduate School of
Korea Maritime and Ocean University

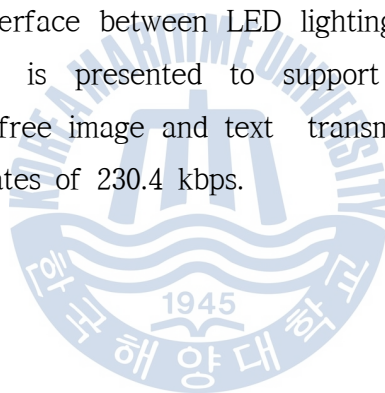
Abstract

Recently, a variety of research are proceeding for underwater environment monitoring system and resource development. Underwater Communication infrastructures are required for underwater wireless sensor networks. Method of Underwater wireless communications are radio frequency communications, acoustic communications and optical communications. Underwater communication is severely limited when compared to communications in air because water is essentially opaque to electromagnetic radiation except in visible range. Acoustic systems are capable of long range communication, but offer limited data rates and significant latency due to the speed of sound in water.

On the other hand, optical wireless communication has been proposed as one of the best alternatives to meet the requirements of the underwater observation and subsea monitoring systems.

Therefore, visible light wireless communications is an alternative in underwater. Visible wavelength range have a lower absorption than electromagnetic wave at underwater. And it transmits big data such as photos and videos by using a wide bandwidth.

In this paper, we use the lens for connecting in parallel LED sending away the light. An interface between LED lighting communication system and Bluetooth module is presented to support the underwater-to-air communications. Error free image and text transmission at 3 m of water were achieved at bit rates of 230.4 kbps.



KEY WORDS: Visible light communications, Optical wireless communications, Underwater communications, Bluetooth communications

제 1 장 서 론

1993년 청색 발광다이오드(LED : Light Emitting Diode)의 개발로 고휘도 백색 LED를 이용한 조명이 나타나기 시작했다. 조명으로 가장 많이 사용 중인 형광등은 수은을 사용하여 친환경적이지 못하며, LED에 비하여 전력효율이 매우 낮다. 그동안 LED는 많은 장점에도 불구하고 다른 조명에 비해 고가인 점이 걸림돌이었으나 최근에는 저가형 LED가 개발되어 조명으로서의 적용에 매우 기대가 된다. 또한 LED는 반도체이기 때문에 디지털 제어가 가능하여 PWM(Pulse Widths Modulation)을 이용한 조도 조절뿐만 아니라 무선통신으로도 응용이 가능하다는 장점이 있다[1]. 이로 인해 LED를 이용한 조명의 보급이 확대되면서 조명을 융합한 가시광 통신(VLC : Visible Light Communication) 기술이 주목받고 있으며, 선진국인 미국, 일본, 영국 등을 중심으로 높아지고 있다[2].

Table 1은 광통신의 종류별 개념과 특징을 나타낸 것이다.

Table 1. Feature of Optical communication

분류	설명	관련 기술	특징
유선 광통신	유선의 광섬유 내부에 광 송수신하는 기술	FTTH, 광전달망, 광가입자망, PON, WDM	- 유선 고속통신 - 1,500m 파장 사용
무선 광통신	LD(Laser Diode)를 이용하여 무선 광 송수신하는 기술	LD통신, 건물간 무선통신, FSO(Free Space Optic), 광무선통신, IR	- 장거리 고속 무선통신 - 780nm 이상 파장 사용
가시광 무선통신	LED 조명을 이용하여 가시광 무선 송수신하는 기술	가시광 무선 통신	- 조명 인프라 통신 - 센서, 측위 응용가능 - 380~780nm 가시광 파장

또한 최근 무선 통신의 발전 과정은 장거리 전송보다 고속 전송을 목적으로 발전해왔다. 그러나 앞으로 모든 장소에서 모든 서비스를 만족하는 통신은 찾기 힘들 것으로 보임에 따라 목적이나 상황에 적합한 통신이 주목 받을 것으로 생각되어진다. 그 예로 무선 LAN은 사무실이나 가정의 좁은 공간에 적합하며, RFID는 수 초 정도의 극히 짧은 통신 거리에서 고속전송이 필요하지 않는 곳에서 적합하게 사용된다. 앞으로 이러한 다양한 용도의 무선 통신이 사용되는 것을 고려하여 각 용도에 적합한 무선 통신을 찾는 것이 필요하다[3].

수중 무선통신에서는 지상의 일반적인 채널에 비해 통신에 영향을 주는 요소가 많다. 대표적인 수중 통신은 음파를 매개로 하여 이루어지는데, 바닷물 내의 염분 정도, 수심, 온도에 따라서 정보 전송 시간과 응답 등이 다르다[4]. 뿐만 아니라, 음파를 이용한 통신은 감쇠와 잡음, 다중경로 전파, 시간 변이성, 그리고 도플러 효과 등에 의해 정보 송수신이 어려워진다[5, 6]. 요즘 음파 기술은 주로 잠수부와 배 사이에 무선 통신 링크를 설정 또는 장거리 원격 신호를 전송하는 데 사용된다. 왜냐하면 음파는 매우 낮은 감쇠로 공기 중에서보다 더 빠르게 물을 통과하여 수신되기 때문이다. 그러나 수중에서의 음파는 매우 좁은 대역폭을 가진다. 그러므로 음향 방식은 높은 데이터 율에 접근 할 수 없고 또한 휴대용 통신 장치를 저비용으로 설계하기 힘들다.

하지만 몇 미터 이내 짧은 거리를 위한 고품질 고속 통신 링크가 요구되고 있다. 예를 들어 дай버들 간의 고품질 음성 대화, 비디오 스트리밍 및 센싱 데이터의 전송이 될 수 있다. 그리고 최근에는 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 같은 수중이동체의 개발에 관심이 높아지면서 무선통신이 이슈가 되고 있다. 수백 MHz 에서 작동 시킬 수 있는 광통신은 이러한 요구를 충족시킬 수 있다[7].

그러므로 수중 무선통신을 위해 변조된 가시광 LED를 이용하는 시스템을 제안한다. 형광물질을 도포한 LED의 경우에는 수 MHz 이상의 변조대역폭을 보이므로 고속데이터통신을 제공 할 수 있다. 따라서 안정적인 수중 고속 통신 시스템은 물론이고 뛰어난 휴대성과 매우 저렴한 비용으로 구현할 수 있다는 장점도 가지고 있다.

본 논문에서는 수중에서의 통신을 위한 광송수신부와 지상중계기 역할을 하는 블루투스와의 융합으로 새로운 통신시스템을 구성하여 실험하였다. 최종 수신단은 PC와 스마트폰이며, 수신 데이터를 스마트폰으로도 실시간 전송 받을 수 있어서 사용자의 편리함을 더해줄 수 있다.

2장에서는 가시광 통신의 개념과 국내외 연구 동향을 기술하였고, 3장에서는 대용량의 파일을 전송하기 위해 가시광 무선통신과 RF 무선통신을 연동하여 이미지를 전송하는 실험을 하였다. 가시광 무선통신의 효율을 높이기 위해 송신 LED에 렌즈를 이용하여 통신거리를 늘였다. 송수신 PC의 LabVIEW 프로그램을 이용하여 이미지 파일을 선택하여 전송할 수 있도록 하였고, 20m이내의 거리에서 이미지 파일 전송이 성공적으로 이루어짐을 확인하였다. 수중에서의 가시광 무선통신 실험을 위해 수조를 사용하였으며, 최종 수신단인 스마트폰으로 데이터를 받기 위해 블루투스 통신이 가능한 어플리케이션을 개발하였다. 단방향 가시광 무선통신 시스템을 구축하였으며, 통신거리는 3m로 문자데이터가 성공적으로 전송됨을 확인하였다.

본 논문에서 제안된 통신시스템을 이용하여 향후 스마트폰으로도 이미지와 같은 대용량의 파일 전송이 가능함을 보여주고 있다.

제 2 장 가시광 무선통신

2.1 가시광 통신의 개념

가시광 통신이란 반도체 소자인 LED를 이용하여 빛을 방출하고, PD(Photo Diode)에서 빛을 수신하여 데이터를 전송받는 것을 기본 원리로 한다. 780nm~380nm 대역의 가시광 파장을 사용하는 통신방식으로, 디스플레이나 전광판을 통해 정보를 전달하는 방송형 통신, 교통신호나 자동차 램프에 사용하는 ITS(Intelligent Transport Systems) 통신, 조명기기를 이용한 통신 등 다양한 분야에 대한 적용 연구가 진행 중이다[8].

가시광 통신의 가장 큰 장점으로 RF와 달리 추가적인 인프라 구축이 필요 없고 조명용 인프라를 그대로 활용할 수 있다는 점이다. 그 밖에 주파수 할당의 문제가 없어 국제적으로 호환성이 좋고, 가시광 스펙트럼 사용에 대한 규정이 없어 자유도가 높다. 또한 전자파가 아닌 빛을 이용하는 통신 방법이라서 병원이나 비행기와 같이 전자파에 민감한 지역에서 사용하기에 용이하다. 이에 더해 가시광은 기본적으로 벽을 통과하지 못하므로 보안성이 뛰어난 국지적 네트워크 구축에 용이하다. 반면 가시광 통신은 다른 빛의 간섭이 있으면 통신 장애를 일으킬 수 있으나, 이는 기술적으로 해결 가능한 과제다. 따라서 최근 실내 통신 시스템의 필요성과 LED의 등장으로 인해 가시광 기반의 통신 시스템에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다.

2.2 가시광 통신의 연구동향

2.2.1 국내 기술 동향

최근 LED 조명의 효율이 높아지고 조명 가격이 낮아지는 추세로 조명 시장에서 높은 점유율을 차지할 것으로 예상되며, 국내에서는 LED와 IT의 융합기술로 가시광 통신의 전망이 기대되고 있다.

한국광기술원(KOPTI)는 2001년부터 본격적으로 연구를 진행하였으며, 백색 LED를 이용한 광통신 기술 개발 과제를 수행하였다. LED조명을 이용한 고속 가시광 통신을 위해 LED조명 인터페이스 기술과 변조 기술 등에 대한 연구개발도 진행 중에 있다[9].

한국전자통신연구소(ETRI)에서는 가시광 통신 원천 기술과 검증을 위한 연구 개발이 이루어졌다. 최근 ETRI의 그린 컴퓨팅연구부의 LED통신연구팀은 LED 조명용 가시광 통신변조 기술 분야에서 Coding 기법이 없이 빛의 깜빡임을 제거하고 LED의 Dimming 제어를 이용해 조명에도 손실이 가지 않는 VPM(Variable PPM) 및 R-RZ(Reverse Return to Zero) 변조 기법을 제시하였다. 그리고, 가시광 통신의 모듈레이션 기술뿐만 아니라, 빛의 깜빡거림을 제거하기 위한 라인코딩 기술에 대해서도 많은 연구가 진행되었다[10].

또한 ETRI 및 삼성전자를 주축으로 TTA 가시광통신서비스 실무반 조직을 2007년에 구성하고, 약 21건의 TTA단체 표준규격, 5건의 국가표준 규격을 추진, IEEE 802.15.7 국제표준에 주도적인 표준활동을 추진하며, 가시광 무선 통신 멀티미디어 표준 기술 워크샵을 개최함으로써 산학연에 기술 전파에 온 힘을 기울이고 있다[11].

KAIST(한국과학기술원)에서는 실내 LED조명 기반 가시광 통신 LAN 다중접속에 대한 기술 연구도 진행되었다[12].

또한, 영남대학교 LED-IT 융합산업화 연구센터(LIFTRC)에서는 지경부의 지원 하에 차량 및 조명용 LED 기반의 가시광 통신 기술의 원천기술 및 선도상용화 기술 개발 연구가 진행 중인데, 특히 차량에서의 가시광 무선 통신에 대

해 많은 연구 개발이 진행 되고 있다. 2010년에 실제 도로 환경을 모사한 Vehicle-to-Vehicle, Traffic-to-Vehicle 간의 가시광 무선 통신 채널 모델링 연구를 진행 하였다. 실제 차량의 LED 헤드램프 사양을 고려한 연구가 진행 되고 있으며 관련한 가시광 통신 모듈레이션 기법 및 기존 네트워크와의 결합 등 많은 연구가 진행 중에 있다[13].

LED 조명 확산 정책에 따라 이를 인프라로 활용하는 무선 가시광 무선 통신 기술은 단거리 영역 내에서 차세대 이동통신, USN, 홈 네트워크 분야에서 보안성이 강화된 새로운 무선 접속 기술과 위치 인식 기술로서 인지하고 있어 이에 대한 발전이 기대되고 있다.

확산되는 LED 조명을 인프라로 활용하는 가시광 무선 통신 기술을 단거리 영역 내에서 차세대 이동통신, U-City, 홈 네트워크 분야에서 보안성이 강화된 새로운 무선 접속 기술과 위치 인식 기술로서 인지하고 있으며, LED 조명 산업에 통신을 접목하여 새로운 부가가치를 창출하는 융합 산업으로서의 가능성을 인정하고 검토하기 위하여 가시광 무선 통신의 원천 기술을 개발하고 있다.

수중로봇에 대한 연구와 개발 또한 한국해양연구원, 삼성탈레스 등을 중심으로 국방차원에서 상당한 연구가 이루어지고 있으며 대학차원에서도 다양한 접근을 하고 있지만 수중 가시광통신에 대한 연구동향은 미진한 실정이다. 대부분 가시광 통신은 실내 또는 가로등 LED 등을 이용한 육상 중심의 통신응용에 주력하고 있는 실정이므로 가시광 통신의 수중적용을 위한 연구가 필요한 시점으로 판단된다.

2.2.2 국외 기술 동향

가시광 무선 통신은 LED를 이용해 기존 조명이나 표시 등의 용도는 그대로 수행하면서 통신이 가능하도록 결합한 차세대 통신 기술 분야로 미국, 일본과 유럽 등 주요 선진국에서는 2003년부터 기술개발을 시작하였으며, 특히 유럽은 대형 LED 조명업체를 중심으로 다양한 연구가 진행 중에 있다.

미국은 유럽, 중국, 일본과 함께 세계 LED 조명시장을 선도하고 있으며 자국 내에서 LED 조명이 차지하는 비중은 1~2%로 미미한 수준이지만 규모면에서는 세계 30%에 달하는 수준이다. 정부는 LED의 기술적·시장적 잠재력을 인지하고 국가차원의 기술전략 및 시장기반의 수요확대 프로그램을 체계적으로 추진하고 있다.

2001년부터 에너지부 주도로 기존조명의 대체기술로 LED를 선정하고, 매년마다 ‘다년도 프로그램계획’을 수립하여 기술개발 방향을 제시하고 있다. 2002년부터는 차세대조명 이니셔티브를 수립하여, 2020년까지 200lm/W를 개발하고, 일반조명시장의 50%를 백색 LED로 대체하기 위해 매년 5,000만 달러를 투자하고 있다.

펜실베이니아 주립대학에서는 홈 네트워크 상에서 가정 내 데이터 및 음성, 영상 서비스를 제공하기 위한 고속광대역 접속 기반으로서 전력선 통신과 융합된 가시광 통신시스템을 제안하였고 시뮬레이션을 통하여 1 Gbps에 이르는 고속 데이터 전송이 가능함을 보였다. 또한 최근에는 적외선을 이용하여 1 Gbps를 무선 전송 가능한 광 네트워크 개발도 성공하였다. 인텔사에서는 2008년 11월에 가시광 Trade Show를 국제적으로 제안하였고 CES 2009에서 가시광 통신 시스템으로 ITS 시나리오를 시연하였으며, GPS, 가시광 통신 기술을 연동한 ITS 서비스를 개발하고 있다. 미 정부는 관련 법안과 환경청의 제품 기준 개선안을 통해 LED 전구의 사용을 적극적으로 장려하고 있으며, 대표적으로 에너지 독립안보법안(EISA 2007)을 제정해, 2012~2014년 동안 백열등을 LED와 같은 고효율조명으로 교체하는 정책을 추진하고 있다[14].

현재 EU의 SSL시장이 지속적으로 성장하고 있으며, 정부는 에너지 효율화를

위한 백열등의 규제 등 LED 조명 관련 정책을 시행하고 있다. 2008년에는 적외선 통신과 가시광 통신 등을 포함하여 배선을 새로이 하지 않고 1 Gbps 전송 속도를 제공하는 홈네트워크 국제 표준을 만드는 OMEGA Project라는 연구가 진행되었다. 이 연구결과를 발표한 2011년 2월에 가시광 통신 분야에서는 16개의 고출력 LED를 전송기로 사용하여 100Mb/s의 전송속도를 구현한 데모를 시연하였다. 2011년 기준으로 유럽 조명시장은 120억 유로에 달하는 것으로 평가되는데 이는 유럽 시장은 글로벌 시장 대비 30%정도 규모이다. 유럽램프제조협회(ELCF: European Lamp Companies Federation)는 2012년 LED램프 시장이 전체 시장의 14% 규모이며, 2020년까지 90%로 확대될 것으로 전망하고 있다 [15].

옥스퍼드 대학에서는 White LED 조명을 이용한 가시광 통신의 전송, 대역폭 향상을 위한 변조 기법 및 변조회로, LED Array 및 Detector Array를 이용한 데이터 전송 다중화 기법, 저가의 상향 가시광 변조기, 가시광 통신 채널 환경 분석 및 시뮬레이션 등의 다양한 기술들에 대한 연구 개발을 진행하였다 [16].

지멘스와 프라운호퍼 연구소에서 2010년 1월에 하인리히 헤르츠 연구소와 협력하여 오스람에서 생산된 백색 LED를 사용하여 최대 5미터의 500 Mbps의 무선 데이터 전송을 시연했다. 데이터는 전원 공급 장치를 통해 LED에 의해 방출된 빛의 양을 변조하여 전송되는 방식을 사용하였다[17].

VLCC(Visible Light Communication Consortium)의 기술 개발 동향을 살펴보면, 게이오 대학에서는 조명용 LED를 이용하여 광ID서비스를 제공하는 기술을 1999년부터 연구 개발 했으며, 가시광 통신을 지능형교통 시스템에 적용하는 방안과 LED Array와 이미지센서를 이용한 데이터 전송 다중화 기법, 전력선 통신과 가시광 통신을 융합하는 방안 등의 다양한 연구 개발을 진행되고 있으며, 게이오대학과 나카가와 연구소에서는 수중 다이버 간 음성 통신이 가능한 가시광 무선통신 제품을 개발하여 상용화하는 단계까지 이르렀다[18].

2.3 무선 광 채널

일반적인 무선 광 채널 시스템의 등가모델은 Fig. 1에 제시되어 있다.

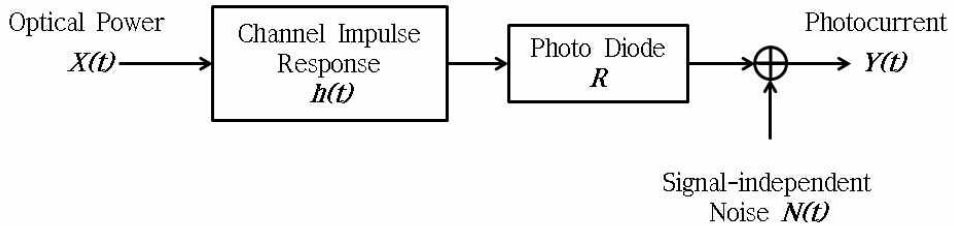


Fig. 1 Visible Light Communication system model

시스템은 광송신기로 LED와 광수신기로 PD를 이용하고, 송신부에 렌즈를 장착한 가시 영역 모델이다. 광학 채널에서 전송 품질은 일반적 산탄 잡음에 의해 지배된다. 거의 또는 전혀 주변광이 존재하지 않는 경우 지배적 잡음원은 독립적인 신호와 가우시안, 전치 증폭기 잡음을 가진다.

따라서 무선 광 채널 모델은 다음 식 (1) 과 같이 표현된다.

$$Y(t) = R \cdot X(t) \otimes h(t) + N(t) \quad (1)$$

$Y(t)$ 는 특정 시간 t 에서의 수신 신호 전류를 나타내며 R 은 수신기의 광 전기 효율을 나타낸다. $X(t)$ 는 전송 된 광 임펄스 응답을 나타낸다. $N(t)$ 는 부가 백색 가우시안 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)을 나타낸다. 그리고 기호 \otimes 는 convolution을 의미한다. 가시영역에서 전송 된 평균 광 전력 P_t 은 다음 식 (2) 에 의해 주어진다.

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) dt \quad (2)$$

채널 DC 이득으로 인한 광 전력 손실은 $H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)dt$ 이고 평균 수신 전력은 $P_r = H(0)P_t$ 이다.

다음 전송 광 전력 P_{tr} 은 다음 식 (3) 과 같이 쓸 수 있다. ϕ 는 방사 각도, m 은 LED의 절반 전력 $\phi_{1/2}$ 에서 세미 각도에 의해 정의되는 방사 패턴의 지향성을 나타낸다. Fig. 2에서는 식 (3) 에 따른 LED 가시광 무선통신의 개략도를 보여준다.

$$P_{tr}(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} P_t \cos^m(\phi) \quad (3)$$

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln \cos \phi_{1/2}}$$

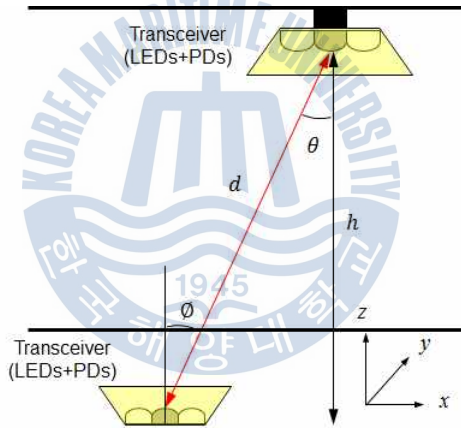


Fig. 2 Schematic diagram for light communication

시스템의 광 채널 이득은 다음 식 (4) 와 같이 정의 할 수 있다.

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \theta \\ 0 & \psi > \theta \end{cases} \quad (4)$$

d 는 송신기와 수신기 사이의 거리이고, ϕ 는 입사각을 나타내며, $T_s(\psi)$ 은 광 필터 이득을 나타내고, ψ 는 FOV(Field Of View)를 나타낸다. 렌즈 이득 $g(\psi)$ 는 식 (5) 와 같이 표현 될 수 있다.

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi} & 0 \leq \psi \leq \theta \end{cases} \quad (5)$$

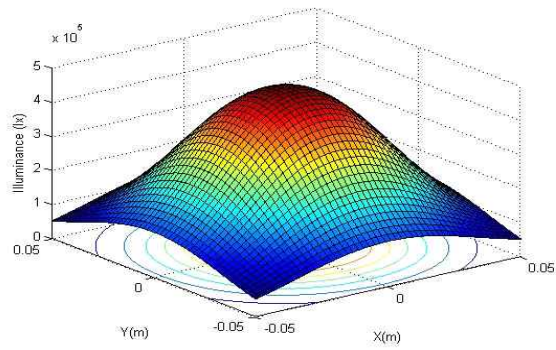
렌즈를 통해 LED 송신부의 집광력과 밝기가 얼마나 향상되는지 Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 해보았다. Table 2는 렌즈 사용에 따른 거리별 조도 값을 나타내었다. Fig. 3은 렌즈가 없을 때 송신 LED의 스펙에 따라 발산각을 $\pm 42.5^\circ$ 로 설정하여 시뮬레이션 한 결과이다. 발산각이 넓어 거리가 멀어짐에 따라 광 감쇠가 심한 것을 알 수 있다. 광 감쇠가 매우 심하여 20m에서 조도 값이 4 lx로 가시광 무선통신이 불가능할 것으로 예상된다.

보다 먼 거리의 가시광 무선통신을 위해 송신 LED 전방에 렌즈를 장착하였고, 이 때의 발산각은 $\pm 10^\circ$ 로 LED의 전력은 개당 5W로 4개를 사용한 것으로 동일하게 설정하였다. Fig. 4에서는 20m에서도 63 lx의 광세기로 렌즈를 사용하지 않았을 때보다 약 15배 정도 높은 조도 값을 보여주는 것을 볼 수 있다.

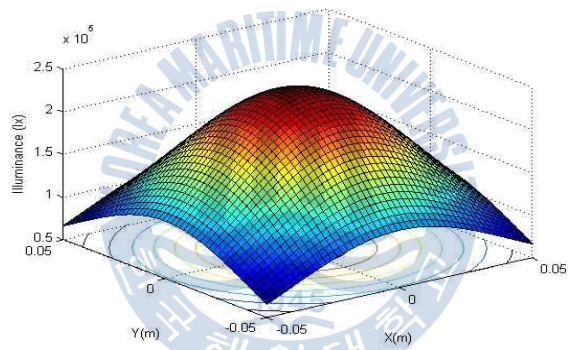


Table 2 Illumination by Lens

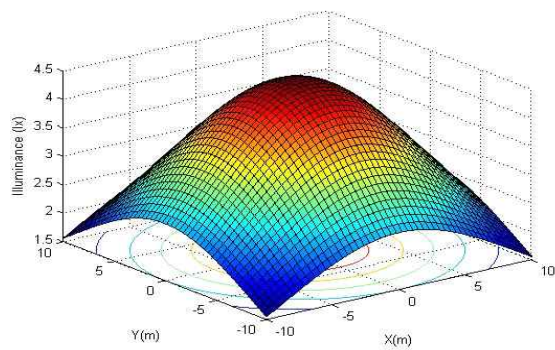
거리 (m)	No Lens	Lens
0.05	460 K	2500 K
0.08	235 K	1100 K
20	4	63



(a) 0.05m

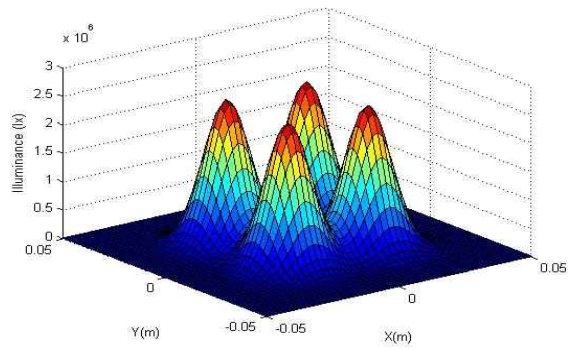


(b) 0.08m

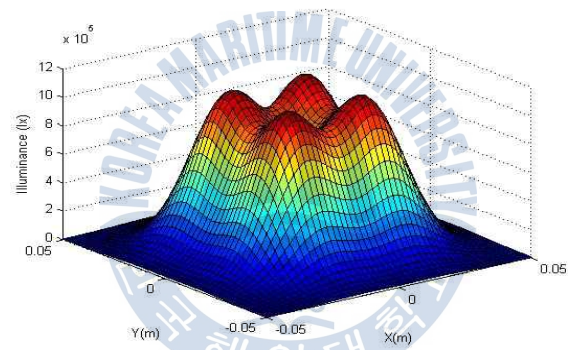


(c) 20m

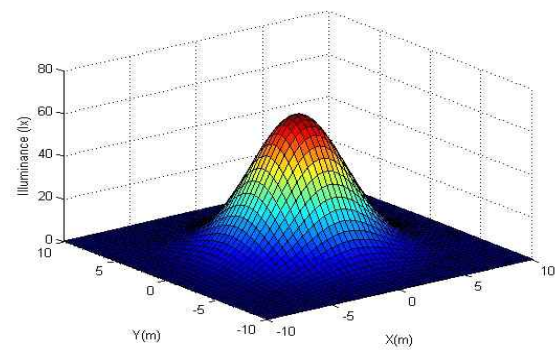
Fig. 3 Illumination by light distance(Not using Lens)



(a) 0.05m



(b) 0.08m



(c) 20m

Fig. 4 Illumination by light distance(Using Lens)

2.4 수중 가시광 통신

수중에서는 케이블 길이의 한계로 인하여 유선통신의 사용이 제한적이라서 해양 탐사 및 모니터링을 위해서는 무선통신이 필수적이다. 무선통신의 종류로는 전파, 음파 그리고 가시광 통신 등이 있을 수 있다. 그러나 Table 3에서 보듯이 물속에서는 육상에서와 같이 전파를 사용할 경우, 여러 가지 물리적 현상에 의해 통신거리가 급격하게 감소하게 되어서 수신감도 및 신뢰도가 낮아지게 된다. 따라서 수중에서는 돌고래와 같이 음파를 이용한 무선 데이터 통신이 가능하다. 음파기반의 무선 통신은 장거리 전송은 가능하지만 수중 잡음과 낮은 데이터 전송률, 높은 파워 소비 그리고 낮은 확산 속도 등의 문제들로 인해 실제 수중에서는 저속 데이터 통신으로 사용이 제한적일 수 있다[19-21].

그러나 광파를 이용한다면 위와 같은 문제점을 극복할 수 있다. Fig. 5는 깨끗한 해수에서의 광 흡수율을 나타낸 것으로 가시광 영역에서의 수중 광 흡수율이 낮아 수중 통신에 적합하며, 낮은 파워 소비와 고속 스위칭으로 데이터 전송률을 높일 수 있기 때문에 근거리 수중 광무선 통신에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들면 2006년에 미국의 우즈홀 해양 연구소는 해저 관측소를 기반으로 근거리 광대역 인터넷 서비스를 제공하는 광무선 모뎀 네트워크를 위한 프로토타입을 개발하였으며, MIT에서는 수중로봇 제어를 위한 광무선 모뎀을 개발 중에 있다[22].

Table 3 Wireless communications of Underwater

	Acoustic	Electromagnetic	Optical
Nominal Speed	1500 m/s	광속	광속
Power Loss	0.1dB/m/Hz	28dB/km/100MHz	탁도
Bandwidth	~kHz	~MHz	10-150MHz
Antenna Size	0.1m	0.5m	0.1m
Effective Range	~km	10m	10-100m

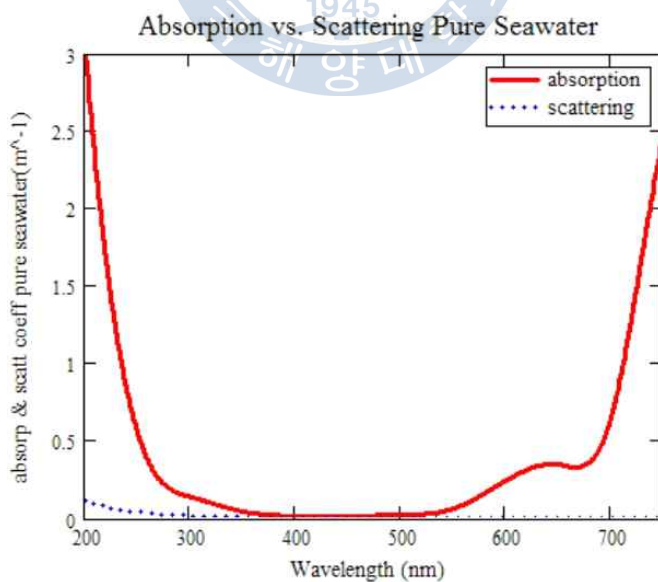


Fig. 5 absorption rate according to a wave at Underwater^[23]

제 3 장 실험 및 결과

3.1 실험 시스템 구성

LED 기반 가시광 무선통신 트랜시버와 블루투스 통신을 연동하는 시스템을 개발하고자 실험을 진행하였다. Fig. 6은 광송신회로도 PC와 LED 구동회로의 연결을 위해 MAX232가 사용되었고, MOSFET을 이용하여 LED를 고속 스위칭 시켜 통신을 가능하게 해준다.

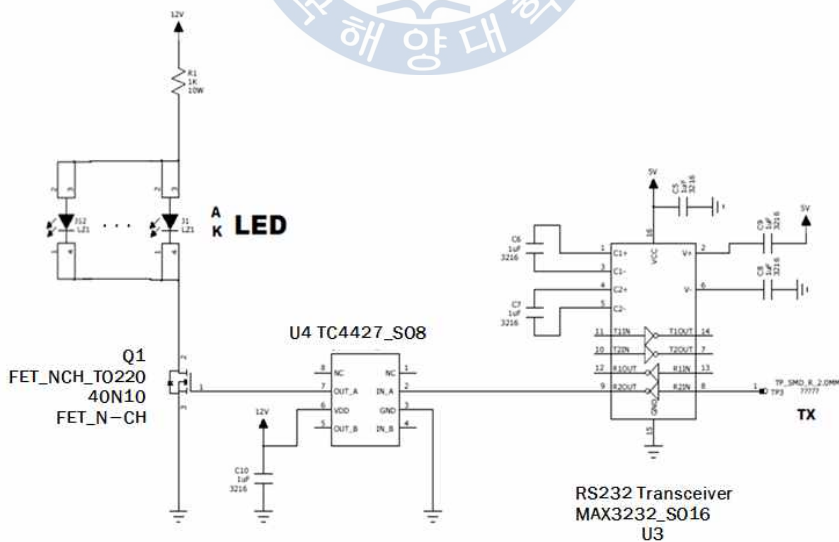


Fig. 6 Circuit of transceiver

Fig. 7은 광수신회로도 PD에서 받은 신호를 OPA380 증폭기를 통해 증폭하고, 비교기를 거쳐 잡음을 걸러내어 0과 5v의 펄스파로 수신하였다. 광수신부의 RX단에는 블루투스 모듈이 연결되어 최종 수신단인 PC와 스마트폰으로 통신이 이루어진다.

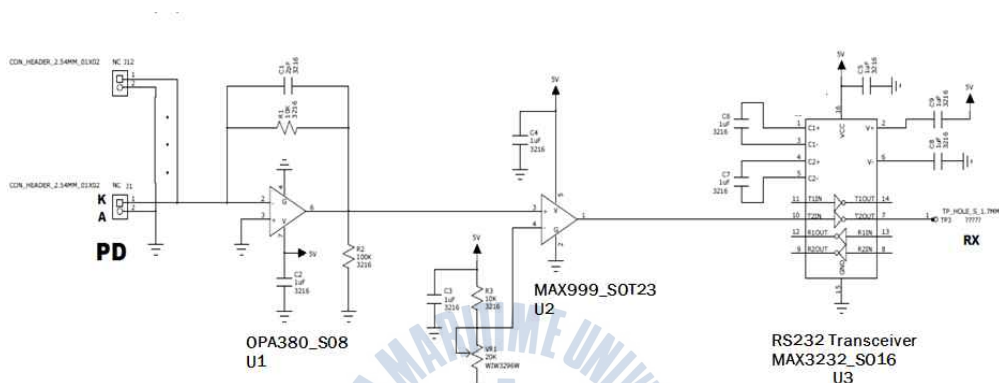


Fig. 7 Circuit of receiver

Table 4는 광송수신부에 사용한 소자의 사양을 정리한 것이다. 고속 데이터 통신을 위해 넓은 대역폭을 가진 소자들을 사용하였다.

Table 4 Devices Specifications

종류	제품명	대역폭	제조사
LED	LZ1-00CW00	10-150MHz	LED Engin
PD	SFH 213	200MHz	OSRAM
증폭기	OPA380	90MHz	Texas Instruments
비교기	MAX999		maxim integrated
MOSFET Drivers	TC4427A	33MHz	Microchip

송신부는 LED Engin사에서 제작한 5W Chip LED를 사용하였다. Fig. 8은 LED의 스펙트럼 분포를 보여주며, 550nm를 중점으로 고른 분포를 보여주고 있으나, 450nm에서 스펙트럼 전력이 큰 것으로 보아 청색LED와 형광체로 이루어진 백색 LED임을 알 수 있다. Fig. 9에서 보듯이 발산각은 85° 로 넓어 빛이 멀리 나아가지 못한다는 단점이 있다.

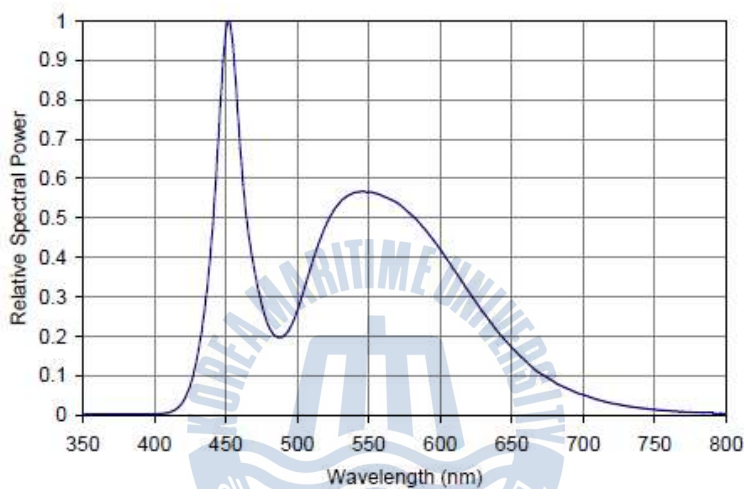


Fig. 8 Spectrum distribution chart^[24]

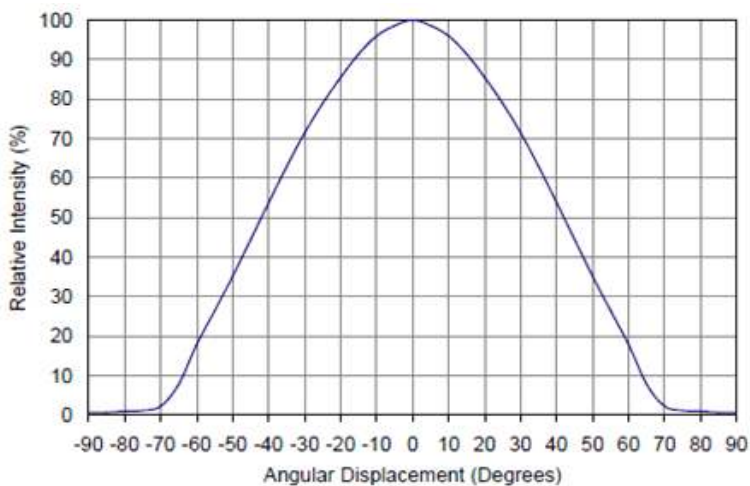


Fig. 9 Divergence angle of LED^[24]

수신부의 PD는 오스람에서 제작한 SFH213을 사용하였으며, Fig. 10과 같이 가시광 영역의 스펙트럼에 반응할 수 있고, switching 시간이 5ns로 짧아서 고속 통신이 가능한 소자를 선택하였다. 하지만 빛을 수신할 수 있는 시야각이 Fig. 11과 같이 $\pm 10^\circ$ 로 매우 좁으므로 수신측에 12개의 PD를 배치하여 단점을 보완하고 수신 성능을 향상 시켰다.

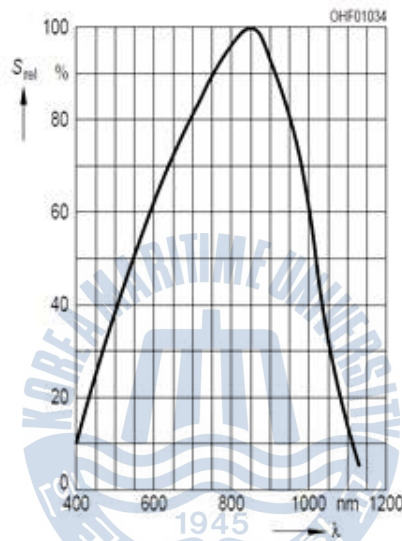


Fig. 10 Spectrum sensitivity^[25]

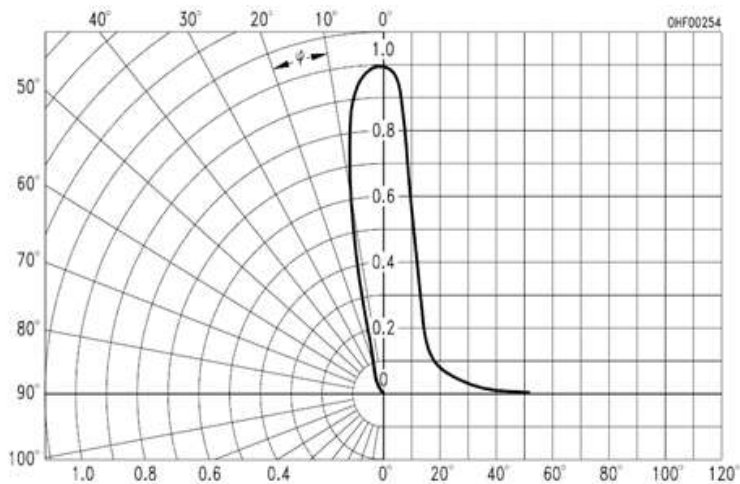


Fig. 11 Field angle of PD^[25]

송수신 회로가 외부에 노출되지 않고 방수하우징에 맞도록 PCB를 Fig. 12와 같이 제작하였다. 송신부의 기판은 LED와 저항의 발열이 심하므로 Metal로 제작하여 방열판 대용으로 제작하였고, 수신부는 발열이 심하지 않으므로 FR-4로 양면 제작 하였다. 송수신부 각각 최대 12개의 LED와 PD를 부착할 수 있도록 설계하여 제작되었다. 12개의 LED를 사용하면 전력소모와 발열이 심하여 조도와 LED 배치를 고려하여 4개만을 사용하였다. 수중에서의 실험을 위해 Fig. 13에서와 같이 하우징을 씌워 광송수신부가 물에 잠길 수 있도록 하였다.

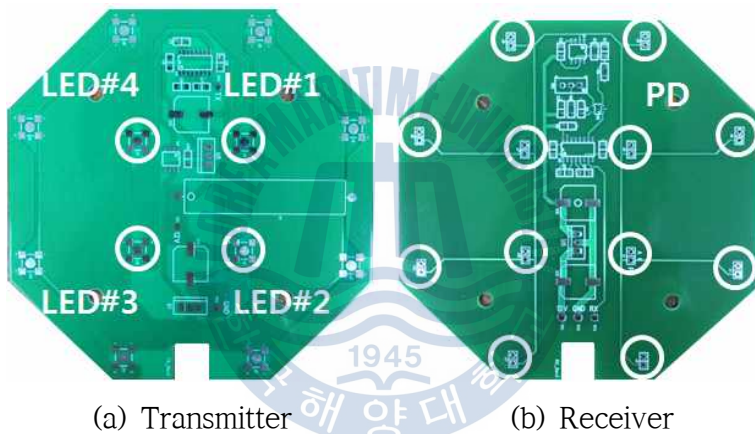


Fig. 12 PCB for housing

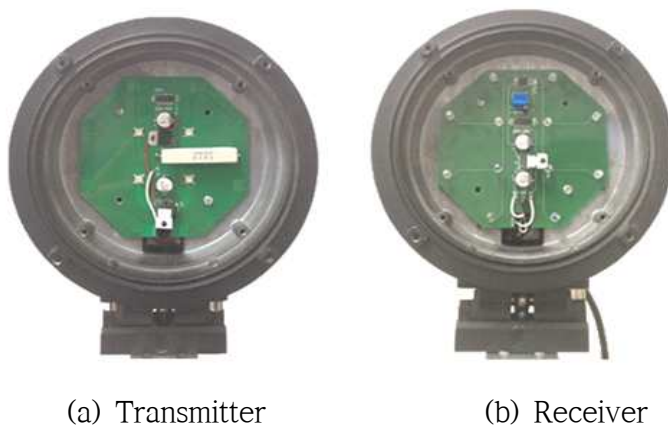


Fig. 13 PCB with housing

가시광 무선 통신 거리를 늘이고 통신의 오류율을 낮추기 위해 가시광 무선 통신 송신부에 렌즈를 달았다. 렌즈는 Fig. 14와 같이 PCB 기판의 LED의 위치에 맞추어 집광효과를 높일 수 있도록 하였다. 렌즈는 송신부에만 결합하여 송신 LED의 집광력을 높였으며, 수신부에는 사용하지 않았다. 수신부 PD에 렌즈를 사용하게 되면 시야각이 좁아져서 데이터에 오류가 많이 발생하여 효율을 떨어뜨린다.



Fig. 14 Condensing Lens

스마트 폰과 데이터 연동을 하기위해 RF 구성단을 블루투스 모듈을 사용하여 실험을 진행하였다. Fig. 15와 같은 시리얼 통신부가 결합된 칩센에서 제조한 블루투스 모듈(BlueM-232B)을 사용하였다. Table 5는 실험에 사용한 블루투스 사양을 나타낸 것으로 블루투스 2.0을 지원한다. 시리얼 통신에서는 약 1 Mbps의 속도까지 지원하지만 블루투스모듈에서 지원하는 안정적인 최대속도는 230.4 Kbps이다. 또한 기존의 블루투스는 무선 통신거리가 100m로 비교적 짧지만 안테나를 적절하게 변경하면 통신거리를 늘일 수 있을 것이라 예상한다.



Fig. 15 Bluetooth module

Table 5 Specification of Bluetooth module

제품명	BlueM - 232B
블루투스 사양	Bluetooth v2.0+EDR
수신감도	-88dBm(0.1BER)
통신거리	100m (Class1)

3.2 지상 가시광 무선통신 시스템 성능 실험

3.2.1 실험 설정 환경

지상에서 가시광 무선통신 실험을 하기위해 각 PC에 LabVIEW로 만든 송수신 프로그램을 통해 속도별 이미지를 전송하였으며, Fig. 16에서와 같이 가시광 무선통신 거리를 10m로 설정하여 PC간 이미지파일을 전송하는 실험을 진행하였다. 가시광 무선통신의 변조 방식은 OOK(On-Off Keying)방식이 사용되었다. PD에서 받아들인 데이터는 수신부 끝단에 위치한 Bluetooth 모듈을 통하여 수신 PC의 블루투스 모듈로 전송이 되며, 최종적으로 수신 PC에서 전송된 이미지를 확인할 수 있도록 하였다.

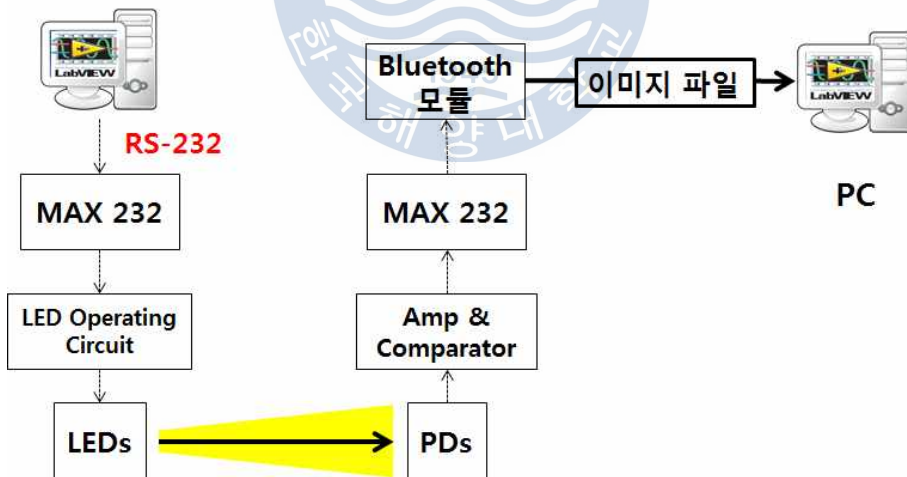
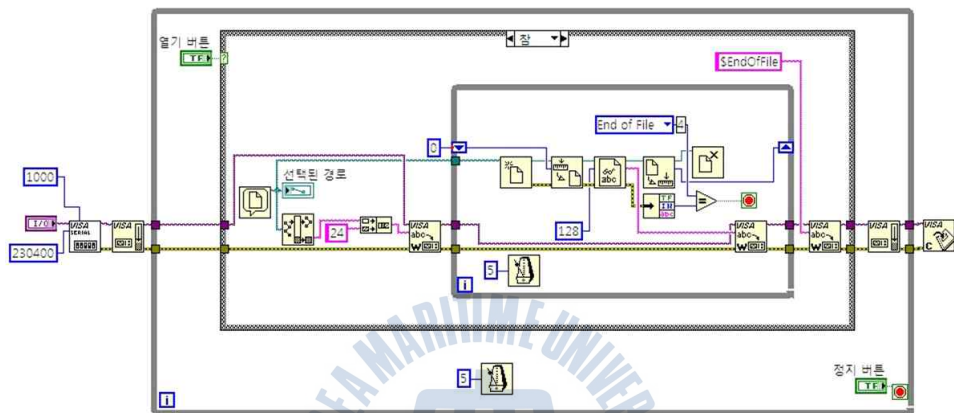


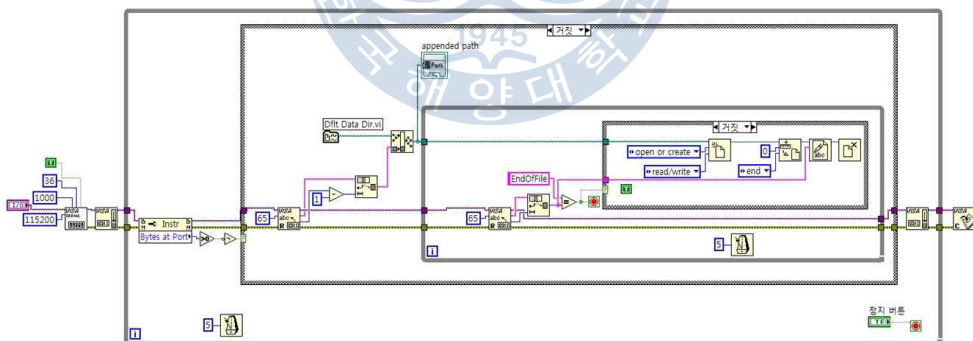
Fig. 16 System schematic for image transmission experiment

Fig. 17 (a)에서와 같이 송신 PC에서 LabVIEW 프로그램을 사용하여 이미지를 선택 후 전송하면 시리얼 통신으로 연결된 LED 구동회로를 통해 가시광 무선 통신이 이루어진다. 데이터 송신 PC의 LabVIEW 프로그램을 통해 시리얼 통신을 구성하기 위해 VISA 함수를 이용하여 시리얼 통신에 필요한 초기 설정을 해준다. 본 프로그램에서는 속도, 흐름제어, 데이터 비트, 패러티, 정지비트를 각각 230.4 Kbps, 없음, 8bits, 없음, 1로 설정하였다. 먼저 송신 프로그램 측에서는 사용자가 송신 할 파일을 파일경로 대화상자를 통해 파일을 선택한다. 선택된 파일은 '텍스트 파일로부터 읽기' 함수를 이용하여 파일을 2진수 데이터로 만든다. 이렇게 만들어진 데이터를 설정된 버퍼용량을 초과하지 않도록 차례차례 수신 프로그램 측으로 전송하게 된다. 이때 2진수 데이터의 마지막 프레임을 보내게 될 때 '\$EndOfFile'이라는 프레임과 함께 송신 종료 메시지를 보낸다. 송신이 완료되면 송신 측 버퍼를 비워 다음 파일을 전송할 수 있도록 준비하게 된다.

수신 프로그램 측에서는 Fig. 17 (b)에서 보듯이 시리얼 수신 버퍼에 데이터가 감지가 되면 수신을 시작하게 되는데 지정된 파일경로와 파일명으로 수신을 하게 된다. 수신된 프레임은 '텍스트 파일에 쓰기'라는 함수를 이용하여 마지막 데이터가 도착할 때 까지 수신 동작을 반복한다. 수신을 할 때에도 수신 버퍼를 초과하지 않도록 차례차례 송신되어진 데이터를 순차적으로 데이터를 이어 붙여 파일을 완성시킨다. 이때 송신 측에서 보낸 '\$EndOfFile'이라는 프레임을 수신하게 되면 수신을 정지하고 파일을 완성시키게 된다. 수신이 완료되면 수신 측 버퍼를 비워 다음 파일을 수신할 수 있도록 준비하게 된다.



(a) Transmitter



(b) Receiver

Fig. 17 LabVIEW block diagram

3.2.2 실험 결과

실제 복도에서 렌즈의 유무에 따른 밝기를 비교해 보았을 때 눈으로 보아도 확실한 차이를 느낄 수 있었다. Fig. 18의 왼쪽은 렌즈를 사용하지 않았을 때의 모습이고, 오른쪽은 렌즈를 이용했을 때의 상황이다. 렌즈를 사용하지 않았을 때에는 빛의 분산이 심해 멀리까지 나아가지 못하지만 렌즈를 사용함으로 집광력이 높아져 먼 곳에서도 가시광 무선 통신이 가능할 것이라고 판단되어진다. 객관적으로 판단하기 위해 조도를 측정하여 Fig. 19와 같이 나타내었다. 100 lux 정도에서도 가시광 무선 통신이 가능하였으므로 렌즈를 사용하면 15m까지도 통신이 가능할 것으로 예상된다.



(a) LED light without Lens (b) LED light with Lens

Fig. 18 Concentrate light by Lens

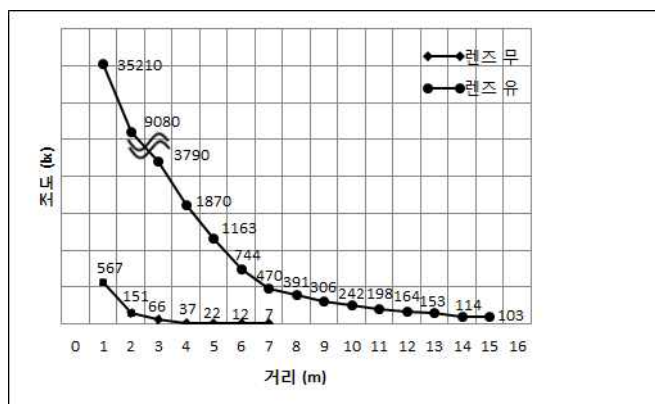


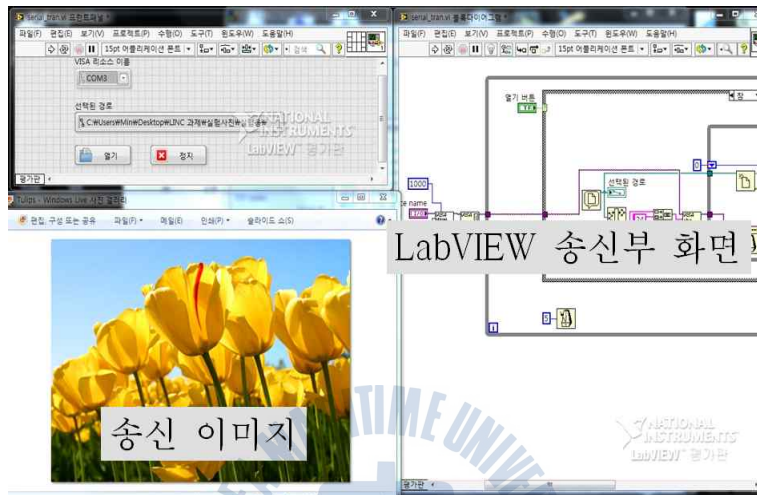
Fig. 19 Illumination LED by Lens

다음 Fig. 20은 PC간 이미지 전송 실험을 하기 위한 실험 구성이며, 가시광 무선통신의 거리는 10m이다. 송신부 PC에서 이미지 파일을 선택하여 데이터를 전송하였으며, 주변광이 없는 저녁시간 야외에서 실험을 진행하였다.

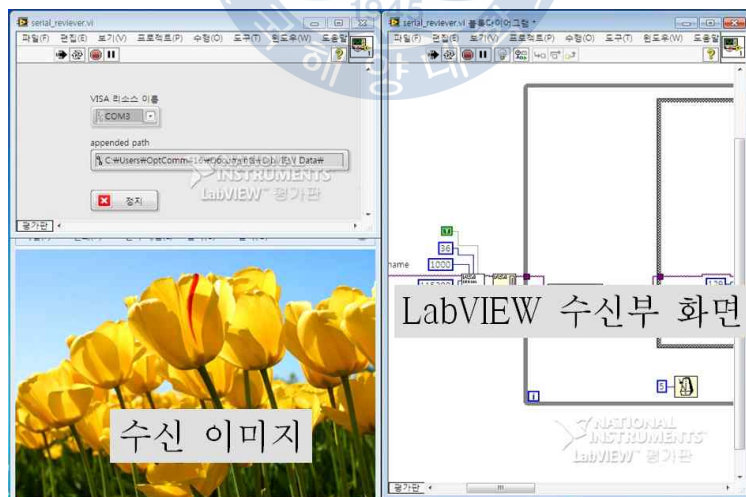


Fig. 20 Visible Light Communication Experiment Environment

가시광 무선통신만의 속도는 실험을 통해 460.8 Kbps의 속도로 통신이 가능했지만, 블루투스 통신의 최대속도에 맞춰서 230.4 Kbps로 이미지 전송 실험을 하였다. 용량이 큰 이미지 파일도 성공적으로 전송하였으며, Fig. 21은 PC간 이미지 통신을 한 결과로 전송한 이미지 파일과 송수신 LabVIEW 화면을 나타내었다.



(a) Transmitter



(b) Receiver

Fig. 21 Visible Light Communication Experiment Result screen

3.3 수중 가시광 무선통신과 블루투스 연동 실험

3.3.1 수중 실험 구성도

수중 가시광 무선통신의 개념도는 Fig. 22와 같이 이루어진다. 먼저, 물속에서 ROV와 같은 수중이동체가 획득한 텍스트, 이미지 그리고 비디오와 같은 대용량의 데이터를 가시광 무선통신으로 전송한다. 전송 받은 데이터는 지상중계기를 통해 주변선박의 PC시스템이나 관측자의 스마트폰으로 최종 전송하게 되는 시스템이다.

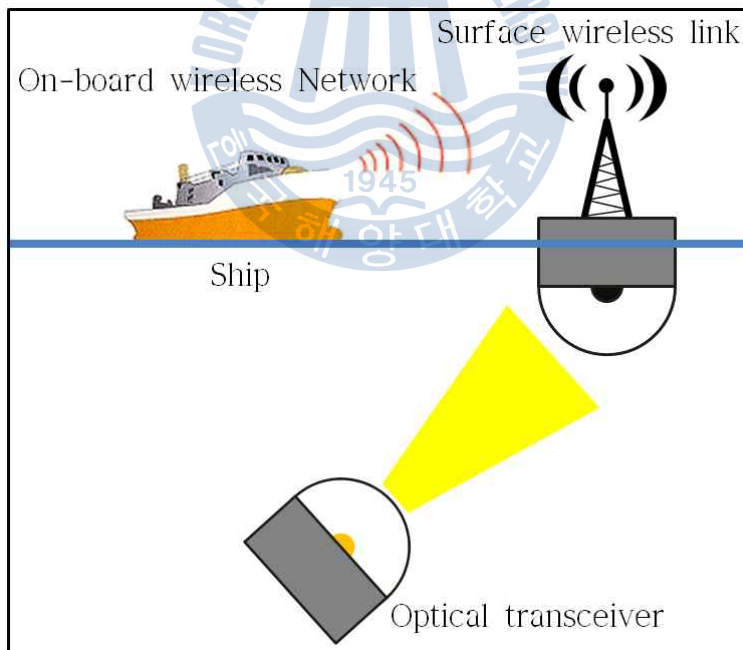


Fig. 22 Underwater Visible Light Communication system

3.3.2 실험 내용 및 결과

수중에서는 지상에서보다 광 전력 손실이 크다. Table 6을 보면 수질에 따라 흡수와 산란 값이 차이가 나며, 오염된 수질일수록 흡수와 산란 값이 커진다. 식 (6)의 α 는 흡수와 산란 값을 합한 감쇠계수로 값이 커지면 광 전력 손실이 커지게 된다. $\frac{P_{rx}}{P_{tx}}$ 는 식 (4)의 $H(0)$ 와 동일하며, 식 (6)을 통해 자유공간과 수중에서 발생하는 광 손실을 수신단의 광 전력 분포로 계산하여 비교하면 Fig. 23과 같은 결과를 도출할 수 있다. 1 m 거리에서는 자유공간에 비하여 수중채널이 2 배 이상의 광 전력 손실이 발생하며 거리가 멀어질수록 그 차이는 더욱 커지고 있음을 보여준다. 동일한 조건으로 자유공간에서 2m 까지 통신이 가능하다면 수중에서는 1 m 정도로 제한됨을 예측할 수 있다.

$$Loss(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{P_{rx}}{P_{tx}}e^{-\alpha(\lambda)d}\right) \quad (6)$$

Table 6 Attenuation coefficient by water quality

Water type	Absorption	Scattering
Pure seawater	0.0405	0.0025
Clean ocean	0.114	0.037
Coastal ocean	0.179	0.219
Turbid harbor	0.266	1.824

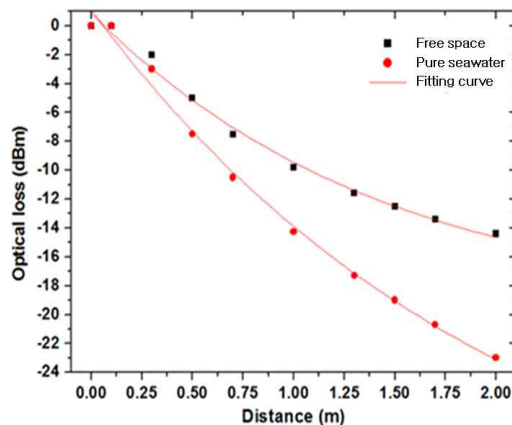


Fig. 23 Optical loss by distance at underwater

Fig. 24는 수중통신을 위한 실험 구성을 보여준다. 수중에서의 실험을 위하여 수조(300×30×35 cm³)를 사용하였으며, 송수신 하우징은 모두 수중에 두고 블루투스 모듈만 수면에 띄워 실험을 진행하였다. 이 때 가시광 무선통신의 거리는 3m로 설정하였고, 블루투스 모듈간의 통신 거리는 모듈에 장착된 1 dBi 스티브 안테나를 사용하여 10m 이내로 통신이 되는 것을 확인하였다. Fig. 25는 수중 가시광 무선통신의 실험 환경을 나타낸다.

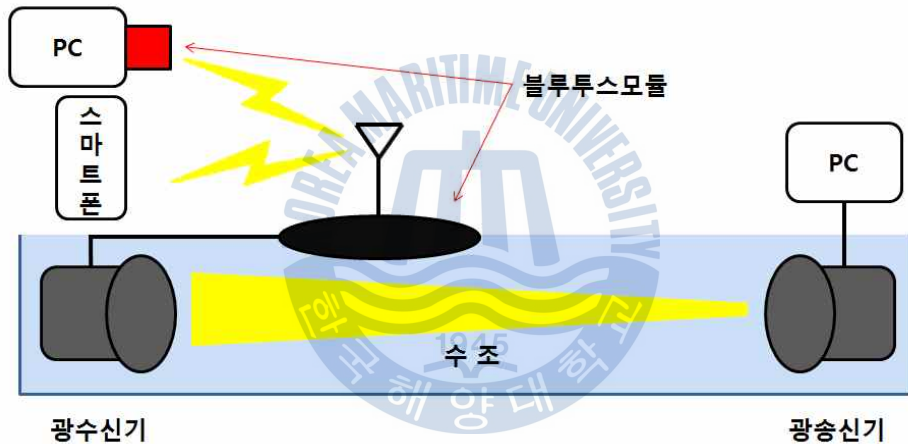


Fig. 24 Schematic of Visible Light Communication system

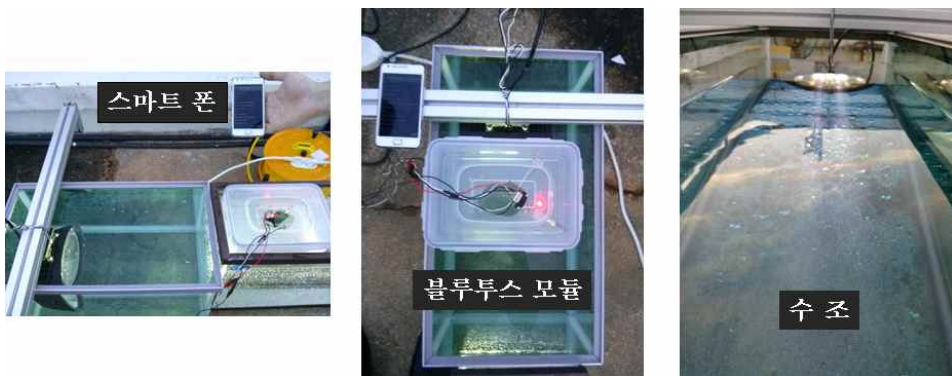


Fig. 25 Photographs of Experimental setup

블루투스 시리얼 통신 컨버터를 수신부의 끝단에 연결시킨 후 그 신호를 안드로이드 기반의 스마트 폰으로 송신하는 실험을 진행하였다.

블루투스 모듈을 설정하기 위해서 PC에서는 하이퍼링크를 사용하였다. Fig. 26은 PC에서의 설정화면이다. 스마트 폰에서는 안드로이드 기반으로 제공되는 어플리케이션을 이용하여 설정할 수 있었다. 먼저, at 명령어를 사용하여 모듈과 PC의 연결 상태를 확인하고, 모듈의 블루투스 주소와 모드, 상태 등을 확인할 수 있었다. atd 명령어 뒤에 연결하고자하는 블루투스 주소를 입력하여 스마트폰과의 연결을 시도하였다. 칩센에서 제공되는 블루투스 모듈에 따른 명령어를 사용하여 모드와 동작 속도를 설정하여 실험하였다.

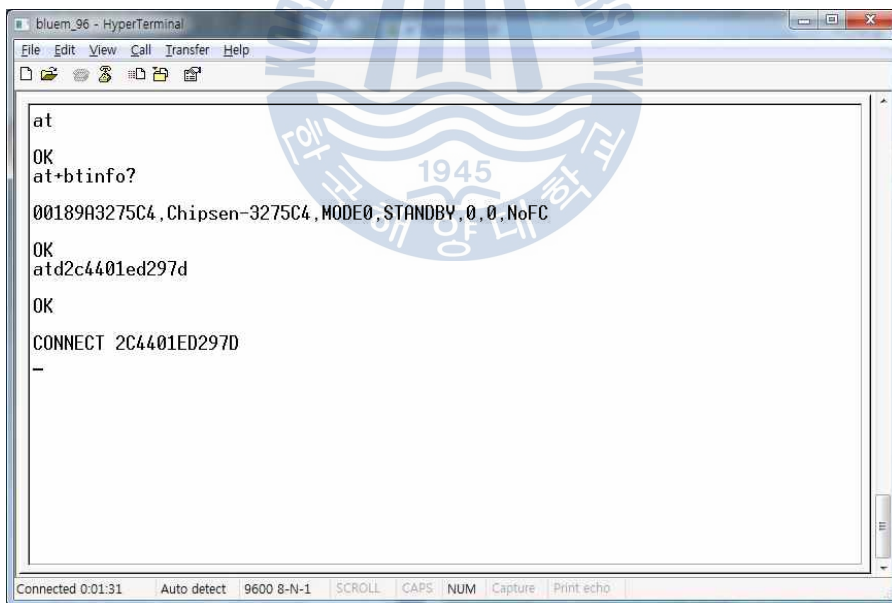


Fig. 26 Hyperterminal Screen for Bluetooth setting

스마트 폰에서 블루투스 통신으로 문자데이터를 받기위해 안드로이드 기반 스마트폰 어플리케이션을 개발했으며, 화면은 Fig. 27과 같다. 어플리케이션은 안드로이드 블루투스 예제를 기반으로 개발하였다. 블루투스 모듈과의 페어링을 위해서 우측상단의 돋보기 모양을 터치하여 주변의 블루투스 기기를 검색하게 된다. 왼쪽 돋보기 모양 아이콘은 보안되지 않는 페어링이고, 오른쪽 돋보기 모양 아이콘은 보안된 페어링을 원할 때 사용한다. 연결이 완료되면 Fig. 27 (b)와 같이 연결된 블루투스 기기명이 출력되고, 모듈과 스마트폰 간의 양방향 블루투스 데이터 통신이 가능하다.

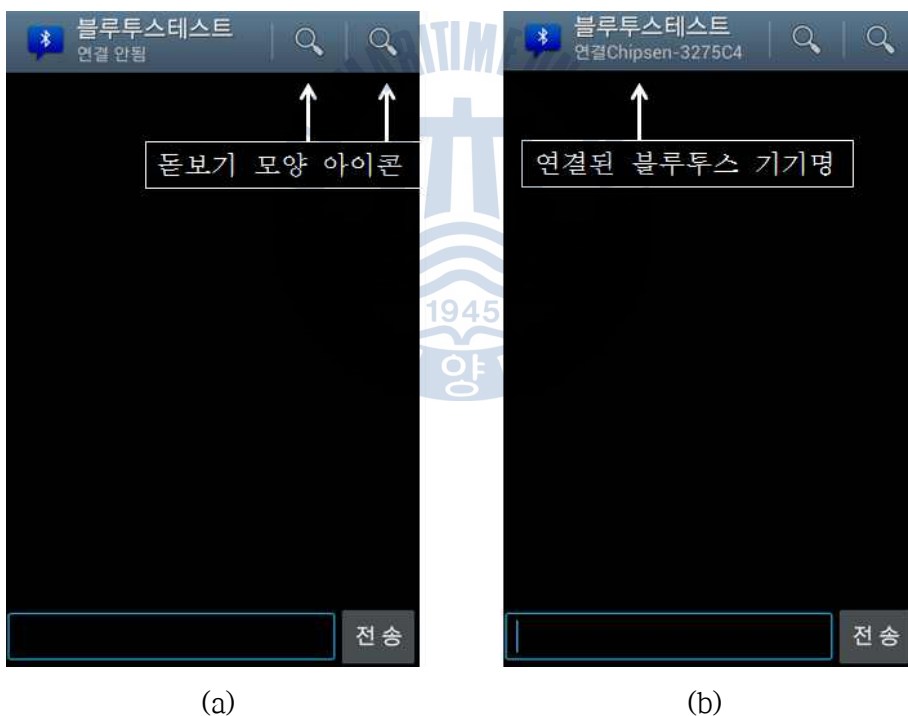
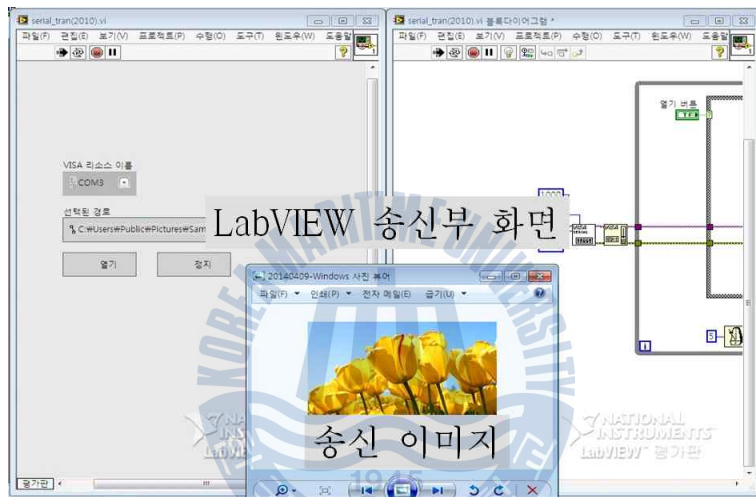
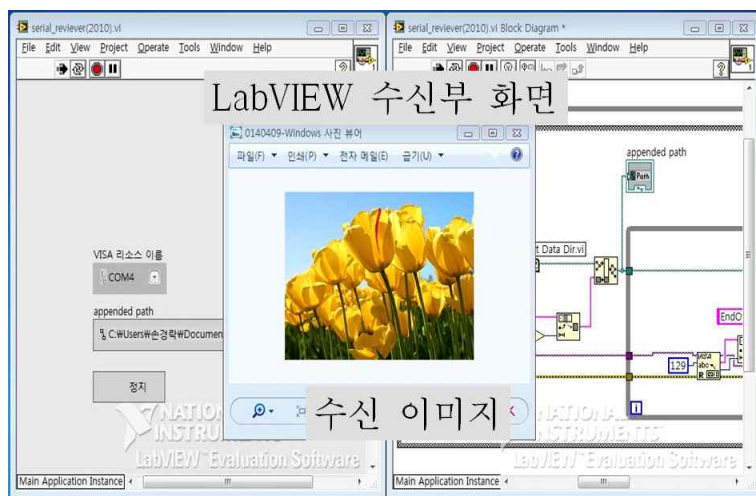


Fig. 27 Bluetooth Screen of Smartphone

Fig. 28은 LED 광원이 있는 송신부에 연결된 PC와 PD를 포함하는 수신부에 연결된 PC와의 이미지 전송 실험 결과이다. 송수신 PC간 전송된 이미지파일과 LabVIEW 화면을 나타내었다. 가시광 무선통신과 블루투스 무선통신을 연동한 통신의 최대 속도는 230.4 Kbps로 이미지 전송에 성공하였다. 실험을 위해 600 Kbyte의 이미지 파일을 전송하였지만, 대용량의 파일도 오류 없이 전송할 수 있다.



(a) Transceiver PC Screen



(b) Receiver PC Screen

Fig. 28 Image transfer at 3m (230.4Kbps)

Fig. 29는 Fig. 24의 실험 구성도에서 송신단 PC와 수신단 블루투스를 통해 PC로 수신한 결과를 보여준다. ‘Welcome to KMOU’ 라는 문자데이터를 전송 하였으며 위의 실험과 동일하게 230.4 Kbps의 속도로 데이터전송에 성공하였다.

Fig. 30에서는 스마트폰에서 전송받은 문자데이터를 보여준다. 받은 데이터는 ‘받음’ 이라는 문자와 함께 화면에 출력된다. 현재는 블루투스 모듈의 기본안테나를 결합하여 블루투스 통신거리는 10m 이내지만 지상중계기 역할을 하는 선박의 안테나를 이용한다면 지상까지 충분히 통신이 될 것이고, 선박 내에 있는 관측자의 스마트폰에도 데이터가 전송될 수 있을 것이다. 수중 가시광 무선 통신거리는 수조 크기의 제약으로 최대거리 3m까지 오류 없는 전송을 확인하였다.

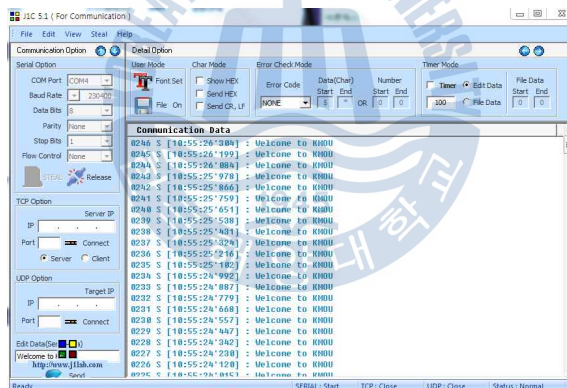


Fig. 29 Received data on PC

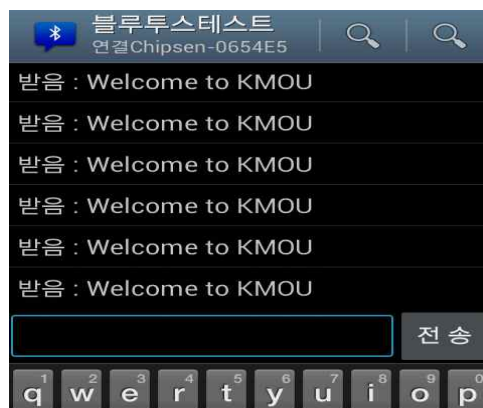


Fig. 30 Received data on Smartphone

제 4 장 결론

가시광 무선통신 시스템의 수중에서의 이점을 살려서 수중에서의 가시광 무선통신과 지상에서의 RF 무선통신을 결합한 통신 시스템에 대한 연구를 했고 문자 데이터를 스마트폰으로 수신하는 실험 내용 및 결과를 기술하였다.

송신 PC와 LED 구동회로를 연결하기 위해 MAX232가 사용되었으며, MOSFET을 이용한 LED 고속 스위칭으로 광 통신을 가능하게 해준다. 고속 스위칭된 광 신호를 PD가 전기적 신호로 변환하여 증폭기와 비교기를 거쳐 완전한 디지털신호로 복원한다.

가시광 무선통신을 이용한 이미지 전송 실험에서는 이미지를 전송하기 위해 LabVIEW를 이용하여 송신 PC에서 이미지를 보내어 Bluetooth 무선통신을 통해 수신 PC까지 이미지 데이터를 오류 없이 전송할 수 있었다. 이 때 가시광 무선통신의 속도는 460.8 Kbps까지 가능했으나, Bluetooth 무선통신에서 안정적으로 통신이 가능한 최대 속도는 낮았다. 시스템의 집광력을 높이기 위해 송신 LED 전면부에 렌즈를 사용하였고, 수신부에는 넓은 시야각을 위해 렌즈를 사용하지 않았다. 가시광 통신 시스템의 최대 속도는 230.4 Kbps로 가시광 무선통신 거리는 15m까지 안정적인 통신이 가능함을 보였다.

수중 가시광 무선통신과 스마트폰 연동 실험에서는 스마트폰으로 데이터를 받기 위해 Bluetooth 어플리케이션을 개발하였다. 어플리케이션을 통해 스마트폰으로도 데이터를 성공적으로 수신할 수 있었으며, 수중 가시광 무선통신거리는 3m이고 최대 통신 속도는 230.4 Kbps였다.

가시광 무선통신에 대한 연구는 국내외에서 활발하게 진행 중이지만, 수중에서의 가시광 무선통신을 이용하고자하는 국내 연구는 미흡하다. 하지만 수중에서 가시광 무선통신의 이점을 살펴보면 수중 근거리 고속 무선통신 기술로의 충분한 가능성을 보여준다.

감사의 글

한국해양대학교 전자통신공학과에 입학하여 지금까지 가르침을 주신 손경락 교수님, 김기문 교수님, 양규식 교수님, 이상배 교수님, 임재홍 교수님, 박동국 교수님, 심준환 교수님, 김정창 교수님께 진심으로 감사드립니다. 석사과정 2년 동안 아낌없이 지원해주시고 지도를 해주신 지도교수 손경락 교수님과 본 논문이 완성되기까지 가르쳐주신 심사위원장 심준환 교수님과 심사위원 박동국 교수님께 다시 한번 감사의 말씀을 드립니다.

석사과정 2년 동안 공대 1호관 4층에서 동고동락하며 석사생활의 활력소가 되어준 석사동기 정성욱 형과 임지훈 형 그리고 이론적인 가르침을 받았던 정정수 형에게 고맙다고 말하고 싶습니다. 광통신 실험실에서 함께 생활했던 김성호와 손창우, 그리고 석사 2년간 옆에서 많은 도움을 준 후배 김준엽, 변종민, 유윤성에게도 고마움을 표합니다.

마지막으로 공부를 할 수 있게 응원해주시고 저를 믿어주시는 우리 부모님 사랑하고 감사합니다. 앞으로도 항상 믿을 수 있는 아들이 되도록 노력하겠습니다. 물심양면으로 지원해준 누나도 고맙고 몸조리 잘해서 건강하고 예쁜 아기 낳길 기도합니다. 항상 옆에서 나를 아껴주고 사랑해주는 신영이에게도 감사하게 생각하고 사랑합니다. 든든한 친구 상기, 정환이도 옆에서 항상 응원해줘서 고맙다. 하는 일 다 잘되자.

이 계기를 통하여 더욱 성장하고 항상 노력하는 사람이 되도록 하겠습니다. 옆에서 도와주신 모든 분들께 다시 한번 감사의 인사를 드리며 항상 보답하며 살아가도록 하겠습니다. 감사합니다!

2015. 01. 12

김민수 올림

참고문헌

- [1] 김대호, 임상규, 강태규, 2009. “LED 조명통신 융합 가시광 무선통신 응용 서비스 모델”, 한국통신학회지, 제 26권, 제 5호, pp. 3-9
- [2] <http://www.ict-omega.eu>
- [3] S.Haruyama, 2003. “可視光通信”, 電子情報通信學會論文誌, J86-A(12), pp. 1248-1291
- [4] 손원국, 2010. “LED조명산업 발전현황과 전망”, 조명전기설비학회지, 제 24권 제 1호
- [5] M. Stojanovic, 2006. “On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel”, Proc. of WUWNET, Los Angeles, CA, Sept.
- [6] P. Qarabaqi and M. Stojanovic, 2009. “Statistical modeling of a shallow water acoustic communication channel”, Proc. Underwater Acoustic Measurements Conference, Nafplion, Greece
- [7] 김민수, 손경락, 2014. “블루투스과 연동하는 수중 가시광 통신 시스템의 구현”, 한국마린엔지니어링 학회지, Vol. 38, No. 7, pp. 923-928
- [8] 계광현, 손경락, 2010. “가시광 LED를 이용한 양방향 무선통신 시스템 연구”, 한국마린엔지니어링 학회지, 제 34권 제 6호, pp. 852-857
- [9] 김종원, 강태규, 정명애, 2009. “가시광 통신 표준 및 기술 동향”, 정보통신연구진흥원 IT-주간기술동향 1400호
- [10] 김대호, 2009. “LED 조명 통신 라인코딩 기술”, TTA 가시광 무선 통신 및 LED 융합 제어 기술 세미나
- [11] 한국정보통신기술협회, <http://www.tta.or.kr/data/reportttalist.jsp>
- [12] ICT 표준화 전략맵, 2010. “ICT중점기술 표준화 전략맵 ver.2011 종합보고서 1권 이동통신 분야”, pp. 285-361
- [13] 정성운, 2010. “LED기반 가시광 통신 기술”, LED-IT융합 산업화 연구센터
- [14] 한국산업기술진흥원, 2011. “미국의 LED 산업 전망 및 정책”

- [15] 한국무역협회, 2012. “EU 고체소자조명(SSL)산업 보고서”
- [16] 옥스퍼드 대학교, <http://www.eng.ox.ac.uk/>
- [17] 김영기, 2010. “LED를 이용한 가시광 통신의 국내외 동향”, 전자부품연구원
- [18] Nakagawa Lab., <http://www.naka-lab.jp/product/uvlc.html>
- [19] Lanbo Liu, Shengli Zhou, and Jun-Hong Cui, 2008. “Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor network”, WILEY wcmc special on underwater sensor networks, pp. 1-24
- [20] Shlomi Arnon, 2010. “Underwater optical wireless communication network”, Optical Engineering 49(1), IEEE OCEANS
- [21] William C. Cox, Jim A. Simpson, Carlo P. Domizioli, John F. Muth and Brian L. Hughes, 2008. “An Underwater Optical Communication System Implementing Reed-Solomon Channel Coding”
- [22] N. Farr, A. D. Chave, L. Freitag, S. N. White, D. Yoerger, and F. Sonnichsen, 2006. “Optical modem technology for seafloor observatories,” Proceedings of IEEE Conference on Oceans, pp. 1-6
- [23] M. A. Chancey, 2005. “Short Range Underwater Optical Communication links”, M.S. Thesis in Electrical Engineering, North Carolina State University
- [24] LED Engin, LED datasheet, <http://www.ledengin.com/products/emitters#LZ1>
- [25] Osram, PD datasheet, http://www.osram-os.com/Graphics/XPic5/00101689_0.pdf